

УДК 538.955

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-2-142-155>

Поведение магнитных систем различной размерности в магнитном поле

Е. В. Шельдешова¹✉, Е. В. Бондарь¹, И. А. Шабанова¹, А. А. Чураев¹,
Е. А. Соколов¹, К. А. Матарыкин¹, П. А. Ряполов¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: blackberry__@mail.ru

Резюме

Цель. Исследовать влияние магнитного поля на образование структур в магнитных средах различной дисперсности.

Методы. Эксперименты по исследованию динамики магнитных включений проводились на самостоятельно изготовленной установке в плоских прозрачных ячейках посредством микроскопии. Магнитное поле создавалось электромагнитом ФЛ-1, подключенным к источнику питания. В качестве магнитной среды исследовались частицы магнетита различного размера, а также металлические шарики диаметром 0,5 мм. Видеофиксация проводилась с помощью микроскопа МИКМЕД WiFi 2000X 5.0.

Результаты. Проведены исследования динамики магнитных включений в вязкой жидкой среде под воздействием магнитного поля, а также в условиях механических сдвиговых воздействий. Изучено влияние напряженности магнитного поля на скорость роста цепочечных структур, а также на угол отклонения при сдвиговом воздействии. Предложена теоретическая интерпретация наблюдаемых явлений.

Вывод. В процессе проведения эксперимента установлено, что под влиянием магнитного поля магнитные включения образуют цепочечные структуры. Их размер, скорость роста и динамика зависят от физических параметров системы и внешнего магнитного поля. Интенсивный рост образования цепочек из магнитных включений обнаружен при малых и средних значениях напряженности магнитного поля. Получена экспериментальная зависимость угла отклонения цепочечных структур из положения равновесия от напряженности магнитного поля, которая коррелирует с известными теоретическими данными, на основании которых предложена расчетная модель. Результаты исследования могут найти применение для визуализации численных расчетов динамики дисперсных систем при внешних воздействиях.

Ключевые слова: магнитные системы; структурообразование; магнитное поле; магнитные жидкости; магнитная гидродинамика.

Финансирование: Работа выполнена в рамках реализации программы стратегического академического лидерства "Приоритет-2030" (Соглашения № 075-15-2021-1155 и № 075-15-2021-1213), а также в рамках реализации Государственного задания Российской Федерации (№ 0851-2020-0035).

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Поведение магнитных систем различной размерности в магнитном поле / Е. В. Шельдешова, Е. В. Бондарь, И. А. Шабанова, А. А. Чураев, Е. А. Соколов, К. А. Матарыкин, П. А. Ряполов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2024. Т. 14, № 2. С. 142–155. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-2-142-155>

Поступила в редакцию 14.04.2024

Подписана в печать 17.05.2024

Опубликована 17.06.2024

© Шельдешова Е. В., Бондарь Е. В., Шабанова И. А., Чураев А. А., Соколов Е. А., Матарыкин К. А.,
Ряполов П. А., 2024

Behavior of magnetic systems of different dimensions in a magnetic field

Elena V. Shel'deshova¹ ✉, Elena V. Bondar¹, Irina A. Shabanova¹,
Alexander A. Churaev¹, Evgeny A. Sokolov¹,
Konstantin A. Matarykin¹, Petr A. Ryapolov¹

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: blackberry__@mail.ru

Abstract

Purpose. To investigate the influence of the magnetic field on the formation of structures in magnetic media of various dispersities.

Methods. Experiments to study the dynamics of magnetic inclusions were carried out on a self-made installation in flat transparent cells by microscopy. The magnetic field was created by an electromagnet FL-1 connected to a power source. Magnetite particles of various sizes, as well as metal balls with a diameter of 0.5 mm, were studied as a magnetic medium. Video recording was performed using a MICMED WiFi 2000X 5.0 microscope.

Results. The dynamics of magnetic inclusions in a viscous liquid medium under the influence of a magnetic field, as well as under conditions of mechanical shear effects, have been studied. The influence of the magnetic field strength on the growth rate of chain structures, as well as on the angle of deflection under shear action, has been studied. A theoretical interpretation of the observed phenomena is proposed.

Conclusion. During the experiment, it was found that under the influence of a magnetic field, magnetic inclusions form chain structures. Their size, growth rate and dynamics depend on the physical parameters of the system and the external magnetic field. An intensive increase in the formation of chains of magnetic inclusions was detected at low and medium values of the magnetic field strength. An experimental dependence of the angle of deviation of chain structures from the equilibrium position on the magnetic field strength is obtained, which correlates with known theoretical data, on the basis of which a computational model is proposed. The results of the study can be used to visualize numerical calculations of the dynamics of dispersed systems under external influences.

Keywords: magnetic systems; structure formation; magnetic field; magnetic fluids; magnetic hydrodynamics.

Funding: The work was carried out within the framework of the implementation of the strategic academic leadership program "Priority 2030" (Agreements No. 075-15-2021-1155 and No. 075-15-2021-1213), as well as within the framework of the implementation of the State Assignment of the Russian Federation (No. 0851-2020-0035).

Conflict of interest: The authors declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Shel'deshova E.V., Bondar E.V., Shabanova I.A., Churaev A.A., Sokolov E.A., Matarykin K.A., Ryapolov P.A. Behavior of magnetic systems of different dimensions in a magnetic field. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2024;14(2):142–155. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-2-142-155>

Received 14.04.2024

Accepted 17.05.2024

Published 17.06.2024

Введение

Свойства магнитных жидкостей, магнитореологических систем и суспензий на основе магнитных частиц определяются их составом и внутренней структурой, которые включают в себя размер, магнитный момент частиц, а также форму и размер образующихся в них агрегатов. Последнее время все большее внимание уделяется

разработке магнитожидкостных систем (МЖС) с увеличенным активным откликом на магнитное поле. Этого можно достичь путем управляемого образования агрегатов и пониманием механизмов их формирования. Одним из популярных вариантов подобных систем является комбинация магнитных частиц различной дисперсности, приводящая к увеличению

диполь-дипольного взаимодействия и образования агрегатов различной формы в первую очередь цепочечной.

Прямое определение размеров наночастиц, присутствующих в МЖС, требует использования специализированного аналитического оборудования. Изначально для изучения магнитных наночастиц применялась просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) [1]. Этот метод чувствителен только к магнитному ядру частиц, поскольку лёгкие элементы органической оболочки не обеспечивают достаточного контраста. Чтобы провести исследование с помощью ПЭМ, образцы МЖС подвергаются сушке, что приводит к блокировке кинетических свойств. Более совершенный подход предполагает использование образцов, замороженных при низкой температуре (крио-ПЭМ). Благодаря этому методу команда учёных под руководством Филлипса смогла зафиксировать формирование линейных дипольных структур *in situ* в МЖС в условиях отсутствия магнитного поля [2]. В рамках этого исследования был обнаружен переход от отдельных частиц с размером наночастиц 2,17 нм к беспорядочно ориентированным линейным агрегатам и разветвлённым цепям при увеличении размера наночастиц до 9,54 нм. Важно отметить, что в работе [2] изучались МЖС с частицами железа, характеризующимися сильным диполь-дипольным взаимодействием. В случае магнетитовых магнитных жидкостей возможно образование слабосвязанных кластеров (облаков магнитных наночастиц) [3].

Цепочечные агрегаты оказывают наибольшее влияние на увеличение вязкости во внешнем магнитном поле [4]. Для интенсификации их образования в магнитную жидкость добавляют крупные магнитные частицы. Такие системы называются бидисперсными и обладают коллоидной стабильностью, однако их вязкость и теплопроводность меняются под воздействием внешнего магнитного поля [5]. Эти

системы используются в демпферах, акустических системах и уплотнениях [6].

Новый этап интереса к изучению магнитовязкого эффекта (МВЭ) в стабильных магнитных жидкостях начался после экспериментов Оденбаха [5], где было обнаружено аномальное увеличение вязкости концентрированных магнитных жидкостей при высоких скоростях сдвига. Эксперименты показали, что увеличение напряжённости магнитного поля вызывает значительное превышение теоретических оценок, что может быть связано с диполь-дипольными взаимодействиями и образованием структур и агрегатов в магнитных жидкостях.

Серия работ А. Ю. Зубарева [7; 8] показала, что образование цепочечных структур оказывает наибольшее влияние на магнитовязкий эффект. Множество исследований было посвящено увеличению магнитовязкого эффекта за счёт изменения структуры магнитной жидкости, её физических и химических свойств [9].

В исследовании [10] было обнаружено влияние размера магнитных частиц на МВЭ. Было выявлено, что для частиц с диаметром менее 10 нм МВЭ незначителен. В исследовании [11] изучалось воздействие концентрации наночастиц в магнитной жидкости. Результаты показали, что при увеличении концентрации частиц взаимодействие между ними усиливается, что приводит к резкому повышению вязкости [12]. Ещё одним структурным параметром, влияющим на МВЭ, является распределение магнитных наночастиц по размерам [13]. В ряде работ изучалось влияние типа поверхностно-активных веществ на МВЭ [14]. Исследование [15] было посвящено анализу бидисперсных систем на основе магнитной жидкости с добавлением микрочастиц. Прирост вязкости составил 92% от вязкости немагнитной магнитной жидкости.

Цепочечные агрегаты и динамика их образования в экспериментальных работах отражена в основном в исследованиях

по магнитовязкому эффекту, которые интерпретируются именно образованием структур, в первую очередь цепочечных. Существует большое количество работ в компьютерном моделировании, которые демонстрируют процесс организации формирования цепочек, однако визуальные наблюдения в модельных средах динамики самоорганизации подобных систем и поведение сдвиговых течений отсутствует [16–18].

В работе [19] был предложен эксперимент по исследованию динамики системы из 2 шариков размером 5 и 2 мм при включении магнитного поля. Однако данная система и соотношение между размерами представленных в ней шариков и вязкостью среды не соотносится с известными значениями частиц в бидисперсных системах на основе магнитных жидкостей и рассматривает только процесс включения магнитного поля без учета изменения его величины и сдвиговых воздействий, что

оставляет вопрос о визуализации формирования цепочечных агрегатов в бидисперсных системах и последующего исследования сдвиговых течений в них открытым, чему и посвящена данная статья. Безусловно, данная система не учитывает теплового движения наноразмерных частиц магнитной жидкости, числовая концентрация частиц в ней мала, частицы не имеют собственного магнитного момента, в ней присутствуют процессы седиментации, которые можно замедлить, используя вязкую жидкость, механическое и ультразвуковое перемешивание, и полученные результаты можно считать лишь первым приближением к реальным процессам самоорганизации в бидисперсных магнитных системах.

Материалы и методы

Для исследования динамики МЖС была разработана экспериментальная установка, схема которой представлена на рисунке 1.

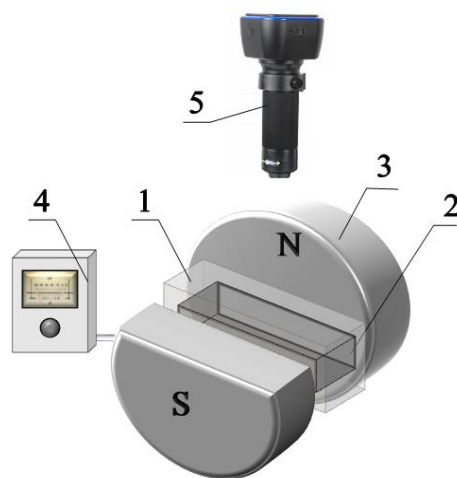


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Fig. 1. Experimental setup diagram

Горизонтальная плоская стеклянная ячейка 1 заполняется исследуемой МЖС 2 и размещается между полюсами электромагнита 3, подключенного к источнику питания 4. Для видеофиксации используется микроскоп 5. В работе использовано три экспериментальные ячейки. Первая ячейка представляет собой параллелепипед из плексигласа со сторонами

110×30×20 мм. Вторая ячейка использовалась для исследования динамики сдвиговых колебаний и отличалась от первой тем, что один из торцов был закрыт эластичной мембраной, а в другой была вставлена загнутая трубка. Ячейка номер 3 представляла из себя микрофлюидный чип стекло – парафильм – стекло размером 113×37 мм, толщиной 5 мм с двумя

Исследование элементного состава порошка показало наличие 90,4% магнетита с незначительной примесью 9,6% углерода в порошке.

Результаты и их обсуждение

В ходе первого эксперимента 200 стальных шариков были размещены в глицерине по всему объему ячейки 1. На рисунке 4 показано формирование цепочек.

Сначала соседние шарики объединяются, образуя скопления из двух-пяти элементов (рис. 4, б), затем они соединяются в несколько параллельных цепочек (рис. 4, в, г и д). При максимальном воздействии (рис. 4, е) образовалось несколько длинных цепочек и несколько коротких.

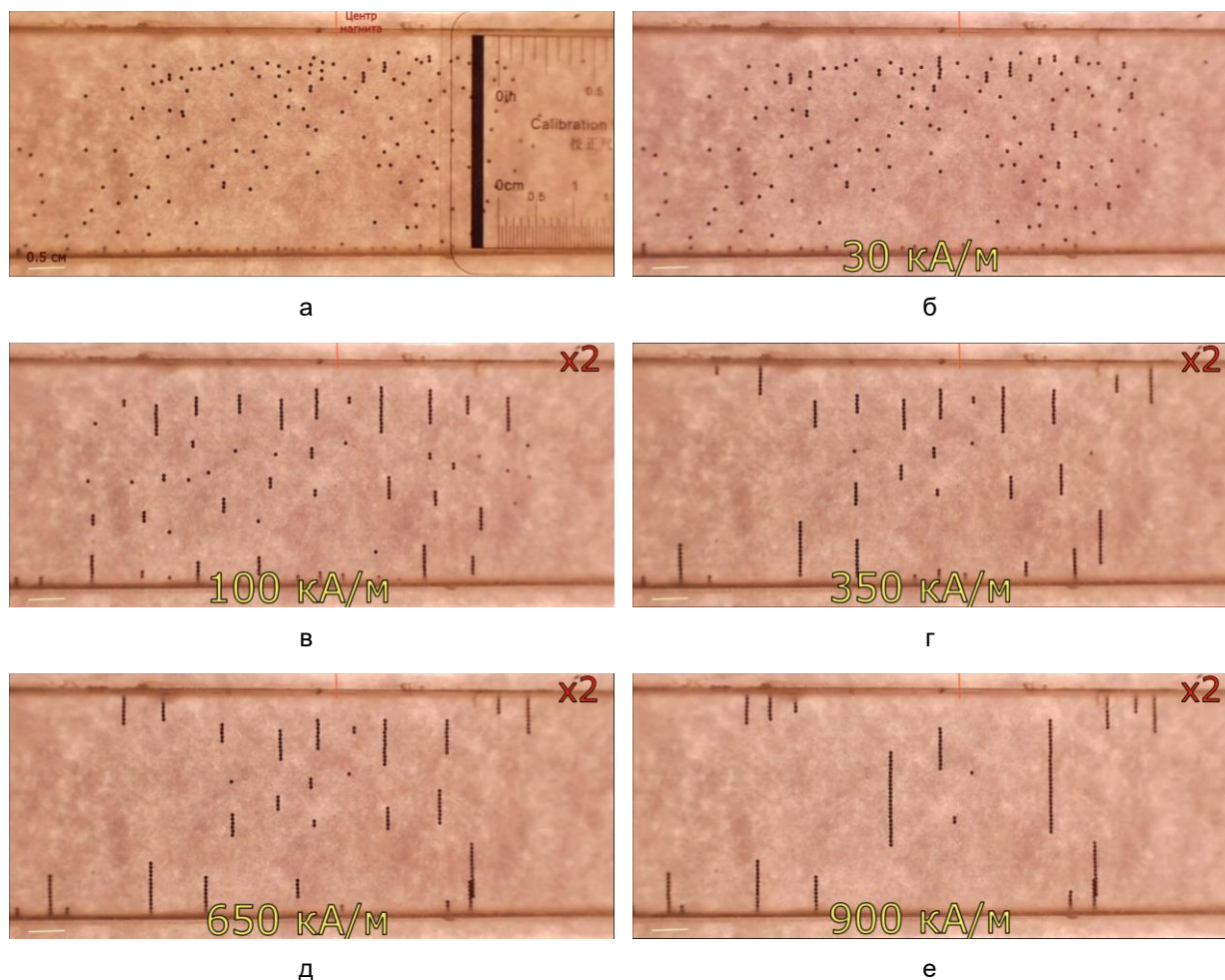


Рис. 4. Результаты эксперимента при объемном распределении шариков при различной напряжённости магнитного поля

Fig. 4. Experimental result for volume distribution of balls at different magnetic field strengths

На рисунке 5 показано, как шарики распределяются в цепочки при разной напряженности магнитного поля. Как видно, в слабых магнитных полях наблюдается одиночное расположение шариков, но с увеличением поля формируются цепочки из двух-пяти шариков, которые за-

тем объединяются в группы из десяти-двадцати шариков. При максимальном магнитном поле образуются длинные цепочки от двадцати до тридцати шариков.

Во втором эксперименте к шарикам в глицерине добавили порошок магнетита. На рисунке 6 показано образование цепочек.

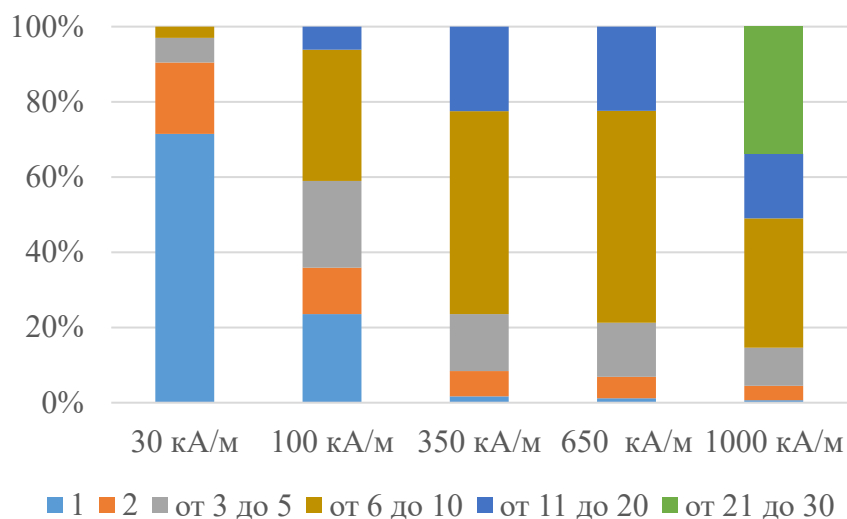


Рис. 5. Доля цепочек определенной длины (от 1 до 30 шариков) при различной напряженности поля

Fig. 5. Proportion of chains of a certain length (from 1 to 30 balls) at different field strengths

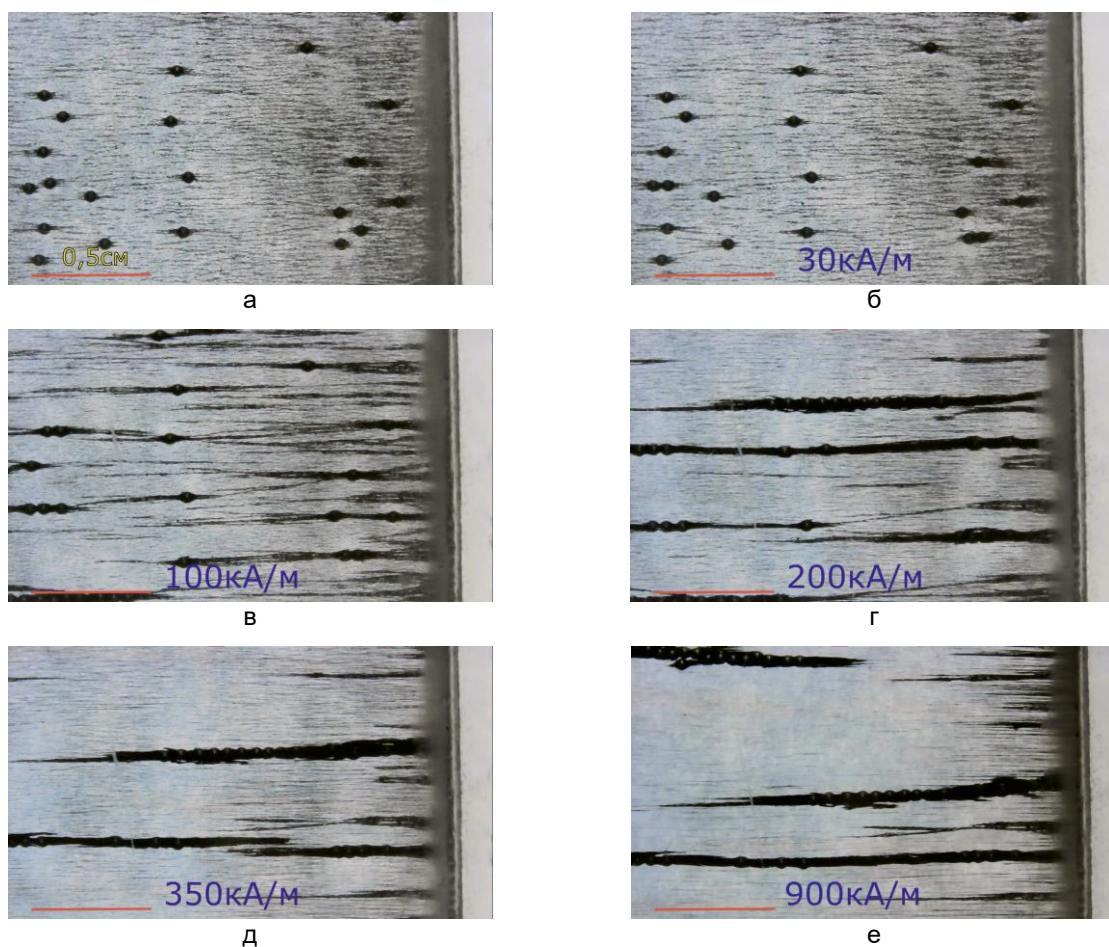


РИС. 6. Результат эксперимента при объемном распределении шариков с порошком магнетита при различной напряжённости магнитного поля

Fig. 6. Experimental result for volumetric distribution of balls with magnetite powder at different magnetic field strengths

При активации магнитного поля частицы начинают двигаться и шарики упорядочиваются (см. рис. 6, б и в), формируя цепочки по два-три шарика. Одновременно (см. рис. 6, б и в) выстраиваются мелкие частицы, которые присоединяются к шарикам. На рисунках 6, г и д мелкие частицы образуют цепочки, и эти короткие цепочки из маленьких частиц объединяются в длинные. В итоге шарики

формируют три цепочки. Завершение процесса упорядочивания показано на рисунке 6, е.

В третьем эксперименте рассматривали систему глицерин – порошок магнетита в микрофлюидном чипе (ячейка номер 3). На рисунке 7 показано образование цепочек частиц. При постепенном увеличении магнитного поля частицы начинают двигаться, образуя цепочки (рис. 7, б-д).

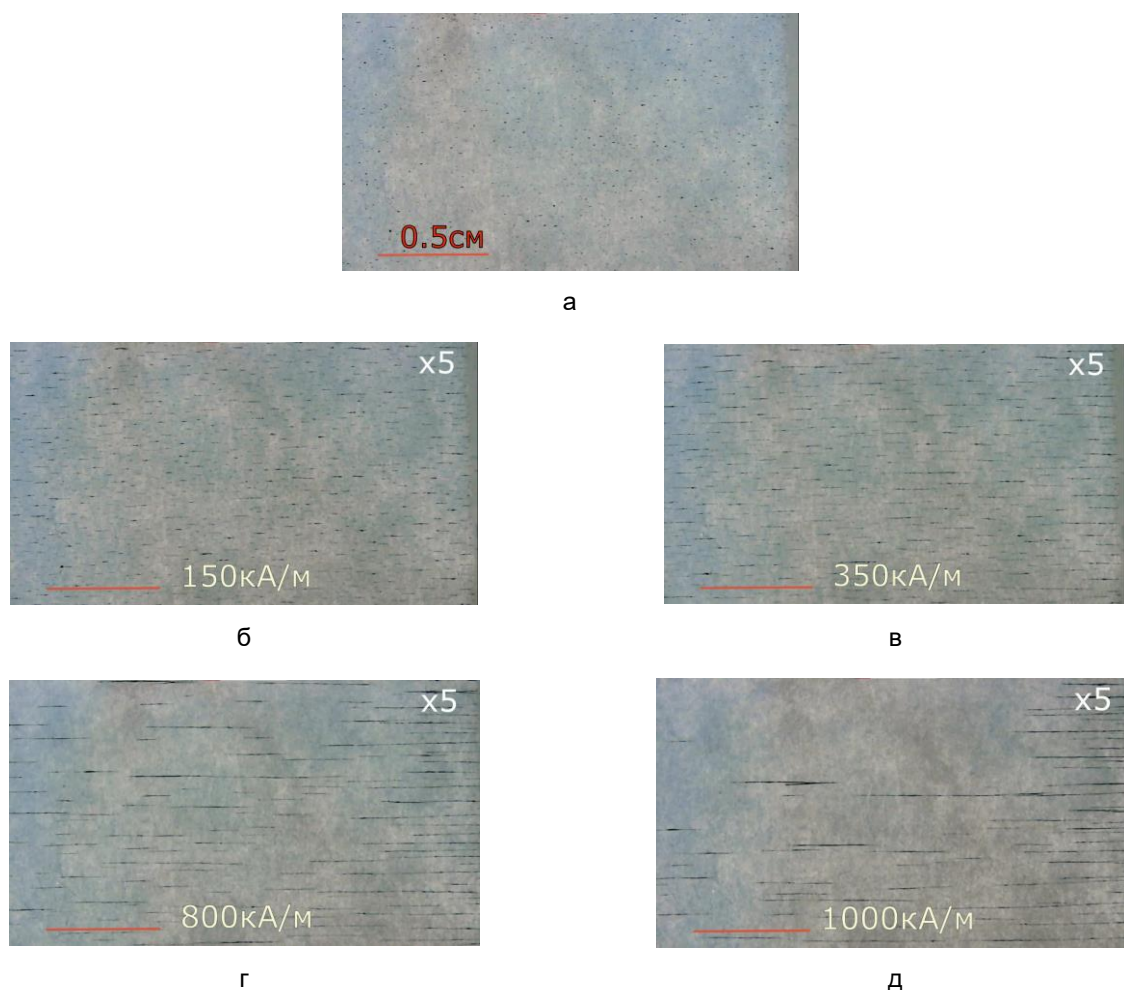


Рис. 7. Результат эксперимента при объемном распределении порошка магнетита при различной напряжённости магнитного поля

Fig. 7. Experimental result for volumetric distribution of magnetite powder at different magnetic field strengths

Подобная динамика роста цепочечных агрегатов наблюдалась в компьютерных экспериментах, представленных в работах [16–18; 23–26]. Непосредственное визуальное наблюдение за наночасти-

цами, к сожалению, невозможно. Единственными работами, в которых такие агрегаты образуются, являются работы Филлипса [2; 28], в которых они росли. Однако известны работы по динамике поведения

частиц в магнитных эластомерах с крупными частицами, по которым данная видеофиксация об образовании подобных цепочек и их физическая интерпретация схожи с полученными в статье результатами [22; 28].

В четвертом эксперименте с помощью механического возбуждения возникают сдвиговые колебания образовавшихся структур в ячейке. При этом каждая цепочка частиц отклоняется от своего первоначального положения на какой-либо угол (рис. 8).

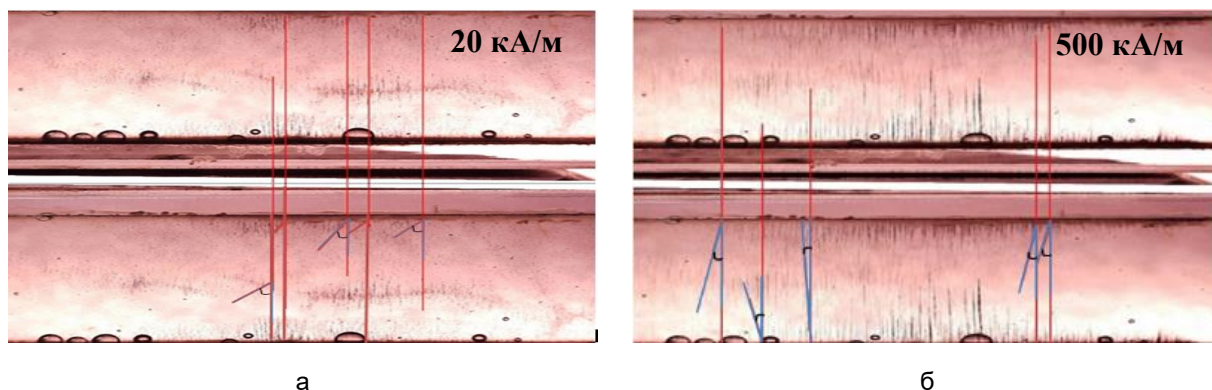


Рис. 8. Результат эксперимента при колебательном воздействии при различном значении внешнего магнитного поля

Fig. 8. Experimental result of oscillatory action at different values of external magnetic field

Угол отклонения цепочек зависит от напряженности магнитного поля, вязкости жидкости носителя и концентрации частиц. На рисунке 9 представлена зависимость распределения углов отклонения от положения равновесия цепочек частиц

при колебательном воздействии при различном значении внешнего магнитного поля.

На рисунке 10 представлено схематическое изображение отклонения цепочки частиц от положения равновесия.

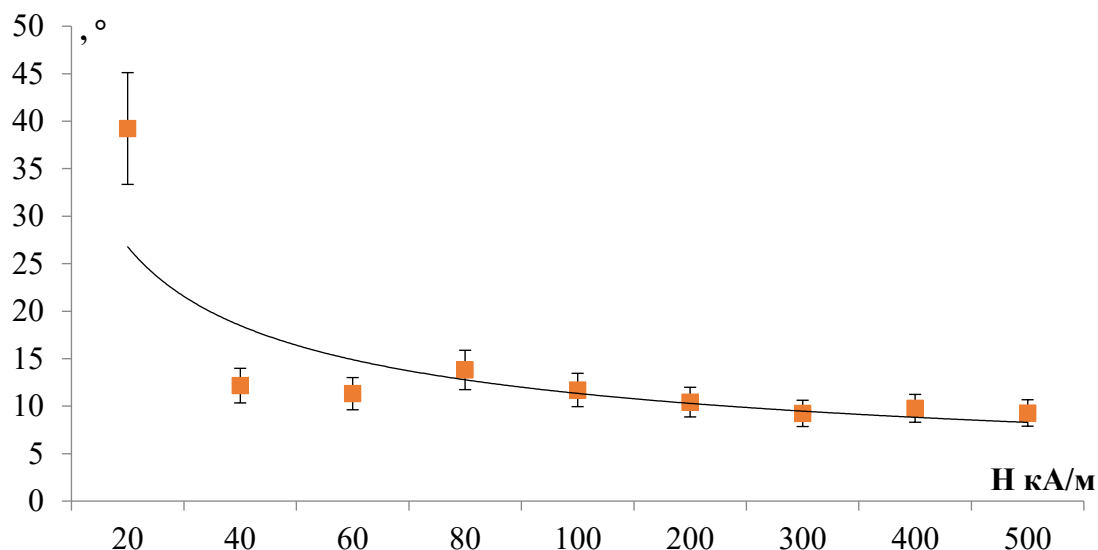


Рис. 9. Зависимость распределения углов отклонения от положения равновесия цепочек частиц при колебательном воздействии при различном значении внешнего магнитного поля

Fig. 9. Dependence of the distribution of the angles of deviation from the equilibrium position of the chains of particles under vibrational action at different values of the external magnetic field

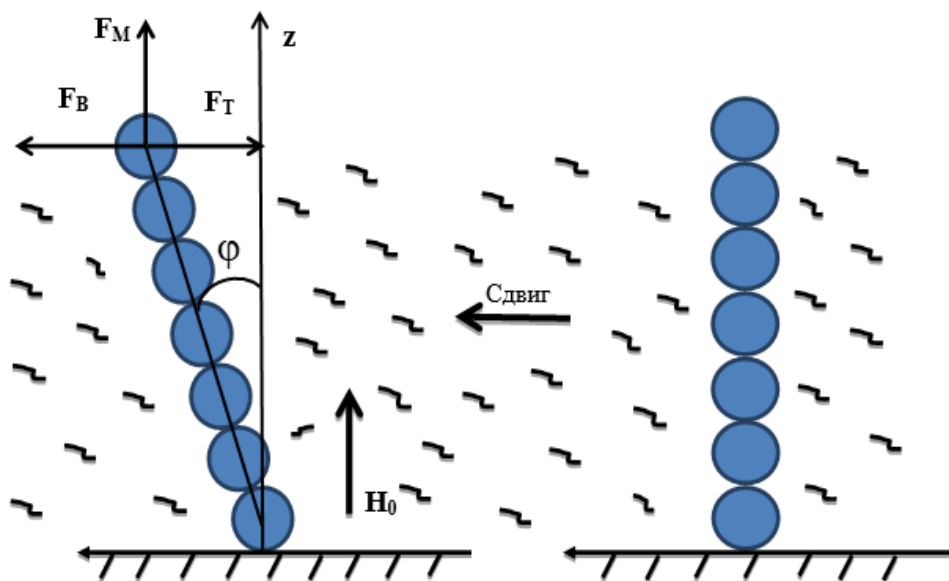


Рис. 10. Схематическое изображение отклонения цепочки частиц от положения равновесия

Fig. 10. Schematic representation of the deviation of a chain of particles from the equilibrium position

Тангенс угла отклонения рассчитывается по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{F_B - F_T}{F_M}, \quad (1)$$

где F_B – сила внешнего воздействия; F_T – сила трения, определяемая по формуле Стокса; $F_T = 6\pi\eta rv$; r – радиус сферического объекта; η – динамическая вязкость жидкости; v – скорость частицы; F_M – магнитная сила; $F_M = \mu_0 M \nabla H$; μ_0 – магнитная постоянная; M – намагниченность системы; ∇H – градиент напряженности магнитного поля внутри частиц. Отсюда

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{F_B - 6\pi\eta rv}{\mu_0 M \nabla H}. \quad (2)$$

Из данного выражения можно сделать вывод, что тангенс угла отклонения цепочки в условиях сдвиговой деформации обратно пропорционален напряженности магнитного поля, что коррелирует с данными, представленными на рисунке 9.

Данная система служит первым приближением для исследования динамики организации бидисперсных магнитных систем в жидких средах. Конечно, на нее

накладывает ограничение седиментация, размеры ячейки и размеры частиц будут влиять на изменение параметров, но в целом она дает представление о динамике данных систем при комбинированных магнитных и механических воздействиях.

Заключение

В работе исследовалась модельная система, состоящая из микрочастиц магнетита и металлических шариков диаметром 0,5 мм, находящихся в вязкой среде – глицерине.

Были проанализированы процессы организации этой системы при увеличении внешнего магнитного поля. Выявлено, что значительное удлинение цепочек происходит в полях с низким и средним уровнем напряженности. Также изучили влияние сдвиговых колебаний на формирование структуры в исследуемой системе.

Результаты исследования могут быть использованы для создания моделей динамики подобных систем и углубления понимания их поведения и организации в магнитных полях и при механических воздействиях.

Список литературы

1. Buhrman R.A., Granqvist C.G. Log-normal size distributions from magnetization measurements on small superconducting Al particles // *Journal of Applied Physics*. 1976. Vol. 47, no. 5. P. 2220–2222.
2. Direct observation of dipolar chains in iron ferrofluids by cryogenic electron microscopy / K. Butter, P.H.H. Bomans, P.M. Frederik, G.J. Vroege, A.P. Philipse // *Nature materials*. 2003. Vol. 2, no. 2. P. 88–91. <https://doi.org/10.1038/nmat811>
3. Apetroaie N., Roca A., Creanga D. E. Direct observation of dipolar chains in iron ferrofluids by cryogenic electron microscopy // *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*. 2005. Vol. 7, no. 6. P. 2865–2868.
4. Ilg P., Odenbach S. Ferrofluid structure and rheology. In: Odenbach S. (ed.) *Colloidal magnetic fluids: basics, development and application of ferrofluids*. Berlin, Heidelberg Springer; 2008. P. 249–325.
5. Ambacher O., Odenbach S., Stierstadt K. Rotational viscosity in ferrofluids // *Zeitschrift für Physik B Condensed Matter*. 1992. Vol. 86, no. 1. P. 29–32.
6. Герметизаторы на основе нанодисперсных магнитных жидкостей и их моделирование / Ю.Б. Казаков, Н.А. Морозов, Ю.И. Страдомский, С.М. Перминов. Иваново: Ивановский гос. энергетический ун-т им. В. И. Ленина, 2010. 184 с.
7. Zubarev A.Y., Odenbach S., Fleischer J. Rheological properties of dense ferrofluids. Effect of chain-like aggregates // *Journal of magnetism and magnetic materials*. 2002. Vol. 252. P.241–243.
8. Role of particle clusters on the rheology of magneto-polymer fluids and gels / W.R. Suarez-Fernandez, G. Scionti, J.D.G. Duran, A.Yu. Zubarev, M.T. López-López // *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2020. Vol. 378(2171). P. 20190254.
9. Borin D.Y., Bergmann C., Odenbach S. Characterization of a magnetic fluid exposed to a shear flow and external magnetic field using small angle laser scattering // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2020. Vol. 497. P. 165959.
10. Odenbach S., Raj K. Recent progress in magnetic fluid research // *Magnetohydrodynamics*. 2000. Vol. 36, no. 4. P. 312–319.
11. Hezaveh H., Fazlali A., Noshadi I. Synthesis, rheological properties and magnetoviscous effect of Fe₂O₃/paraffin ferrofluids // *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2012. Vol. 43, no. 1. P. 159–164.
12. The effect of nanoparticle concentration on the rheological properties of paraffin-based Co₃O₄ ferrofluids / S. Masoud Hosseini, E. Ghasemi, A. Fazlali, E. Henneke Dale // *Journal of Nanoparticle Research*. 2012. Vol. 14. P. 858.
13. Thurm S., Odenbach S. Particle size distribution as key parameter for the flow behavior of ferrofluids // *Physics of Fluids*. 2003. Vol. 15, no. 6. P. 1658–1664.
14. Khosroshahi M.E., Ghazanfari L. Preparation and rheological studies of uncoated and PVA-coated magnetite nanofluid // *Journal of magnetism and magnetic materials*. 2012. Vol. 324, no. 24. P. 4143–4146.
15. Patel R., Virapura H., Parmar M. Magnetoviscous effect in dilute bidispersed ferrofluids through micro capillary // *Journal of Nanofluids*. 2014. Vol. 3, no. (4). P. 307–311.
16. Sear R. P. Low-density fluid phase of dipolar hard spheres // *Phys. Rev. Lett*. 1996. Vol.76. P. 2310.
17. Зубарев А.Ю. Реологические свойства полидисперсных магнитных жидкостей. Влияние цепочечных агрегатов // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2001. Т. 120, № 1. С. 94–103.
18. Ivanov A.O., Kantorovich S.S. Chain aggregate structure and magnetic birefringence in polydisperse ferrofluids // *Physical Review E*. 2004. Vol. 70, no. 2. P. 021401.

19. Analysis on the enhancement mechanism of bidisperse magnetorheological fluid based on the local microstructural models / H. Huang, H. Li, W. Wang, X. Peng // *Rheologica Acta*. 2022. Vol. 61. P. 87–98.
20. Динамика магнитных жидкостей и бидисперсных магнитных систем при колебательных сдвигах / Е.В. Шельдешова, П.А. Ряполов, А.Г. Рекс, А.В. Трепачев // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2022. Т. 12, № 3. С. 130–146.
21. Shel'deshova E., Churaev A., Ryapolov P. Dynamics of magnetic fluids and bidisperse magnetic systems under oscillatory shear // *Fluids*. 2023. Vol. 8, no. 2. P. 47.
22. Magnetorheological effect of magnetoactive elastomer with a permalloy filler / D. Borin, G. Stepanov, A. Musikhin, A. Zubarev, A. Bakhtiarov, P. Storozhenko // *Polymers*. 2020. Vol. 12, no. 10. P. 2371.
23. Travares J.M., Telo da Gama M.M., Osipov M.A. Criticality of dipolar fluids: Liquid-vapor condensation versus phase separation in systems of living polymers // *Phys. Rev. E*. 1997. Vol. 56. P. 6252.
24. Tavares J.M., Weis J.J., Telo da Gama M.M. Strongly dipolar fluids at low densities compared to living polymers // *Phys. Rev. E*. 1999. Vol. 59. P. 4388.
25. Levin Y. When do like charges attract? // *Phys. Rev. Lett.* 1999. Vol. 83. P. 1159.
26. Levin Y., Kuhn P.S., Barbosa M.C. Criticality in polar fluids // *Physica A*. 2001. Vol. 292. P. 129.
27. Direct observation of dipolar chains in ferrofluids in zero field using cryogenic electron microscopy / K. Butter, P.H.H. Bomans, P.M. Frederik, G.J. Vroege, A.P. Philipse // *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2003. Vol. 15, no. 15. P. 1451.
28. Magnetorheological effect in dense magnetic polymers / D. Borin, G. Stepanov, A. Musikhin, A. Zubarev // *The European Physical Journal Special Topics*. 2022. Vol. 231, no. 6. P. 1165–1173.

References

1. Buhrman R.A., Granqvist C.G. Log-normal size distributions from magnetization measurements on small superconducting Al particles. *Journal of Applied Physics*. 1976;47(5):2220–2222.
2. Butter K., Bomans P.H.H., Frederik P.M., Vroege G.J., Philipse A.P. Direct observation of dipolar chains in iron ferrofluids by cryogenic electron microscopy. *Nature materials*. 2003;2(2):88–91. <https://doi.org/10.1038/nmat811>
3. Apetroaie N., Roca A., Creanga D.E. Direct observation of dipolar chains in iron ferrofluids by cryogenic electron microscopy. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*. 2005;7(6):2865–2868.
4. Ilg P., Odenbach S. Ferrofluid structure and rheology. In: Odenbach S. (ed.) *Colloidal magnetic fluids: basics, development and application of ferrofluids*. Berlin: Heidelberg Springer; 2008. P. 249–325.
5. Ambacher O., Odenbach S., Stierstadt K. Rotational viscosity in ferrofluids. *Zeitschrift für Physik B Condensed Matter*. 1992;86(1):29–32.
6. Kazakov Y.B., Morozov N.A., Stradomsky Y.I., Perminov S.M. Sealers on the basis of nano-disperse magnetic liquids and their modeling. Ivanovo: Ivanovskii gos. energeticheskii un-t im. V.I. Lenina; 2010. 184 p. (In Russ.)
7. Zubarev A.Y., Odenbach S., Fleischer J. Rheological properties of dense ferrofluids. Effect of chain-like aggregates. *Journal of magnetism and magnetic materials*. 2002;252:241–243.
8. Suarez-Fernandez W.R., Scionti G., Duran J.D.G., Zubarev A.Y., López-López M.T. Role of particle clusters on the rheology of magneto-polymer fluids and gels. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2020;378(2171):20190254.

9. Borin D. Y., Bergmann C., Odenbach S. Characterization of a magnetic fluid exposed to a shear flow and external magnetic field using small angle laser scattering. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2020;497:165959.
10. Odenbach S., Raj K. Recent progress in magnetic fluid research. *Magnetohydrodynamics*. 2000;36(4):312–319.
11. Hezaveh H., Fazlali A., Noshadi I. Synthesis, rheological properties and magnetoviscos effect of Fe₂O₃/paraffin ferrofluids. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2012;43(1):159–164.
12. Masoud Hosseini S., Ghasemi E., Fazlali A., Henneke Dale E. The effect of nanoparticle concentration on the rheological properties of paraffin-based Co₃O₄ ferrofluids. *Journal of Nanoparticle Research*. 2012;14:858.
13. Thurm S., Odenbach S. Particle size distribution as key parameter for the flow behavior of ferrofluids. *Physics of Fluids*. 2003;15(6):1658–1664.
14. Khosroshahi M.E., Ghazanfari L. Preparation and rheological studies of uncoated and PVA-coated magnetite nanofluid. *Journal of magnetism and magnetic materials*. 2012;324(24):4143–4146.
15. Pate R., Virapura H., Parmar M. Magnetoviscous effect in dilute bidispersed ferrofluids through micro capillary. *Journal of Nanofluids*. 2014;3(4):307–311.
16. Sear R.P. Low-density fluid phase of dipolar hard spheres. *Phys. Rev. Lett.* 1996;76:2310.
17. Zubarev A.Y. Rheological properties of polydisperse magnetic liquids. Influence of chain aggregates. *Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki = Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2001;120(1):94.
18. Ivanov A.O., Kantorovich S.S. Chain aggregate structure and magnetic birefringence in polydisperse ferrofluids. *Physical Review E*. 2004;70(2):021401.
19. Huang H., Li H., Wang W., Peng X. Analysis on the enhancement mechanism of bidisperse magnetorheological fluid based on the local microstructural models. *Rheologica Acta*. 2022;61:87–98.
20. Sheldeshova E.V., Ryapolov P.A., Rex A.G., Trepachev A.V. Dynamics of magnetic fluids and bidisperse magnetic systems under oscillatory shifts. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2022;12(3):130–146.
21. Shel'deshova E., Churaev A., Ryapolov P. Dynamics of magnetic fluids and bidisperse magnetic systems under oscillatory shear. *Fluids*. 2023;8(2):47.
22. Borin D., Stepanov G., Musikhin A., Zubarev A., Bakhtiiarov A., Storozhenko P. Magnetorheological effect of magnetoactive elastomer with a permalloy filler. *Polymers*. 2020;12(10):2371.
23. Travares J.M., Telo da Gama M.M., Osipov M.A. Criticality of dipolar fluids: Liquid-vapor condensation versus phase separation in systems of living polymers. *Phys. Rev. E*. 1997;56:6252.
24. Tavares J.M., Weis J.J., Telo da Gama M.M. Strongly dipolar fluids at low densities compared to living polymers. *Phys. Rev. E*. 1999;59:4388.
25. Levin Y. When do like charges attract? *Phys. Rev. Lett.* 1999;83:1159.
26. Levin Y., Kuhn P. S., Barbosa M. C. Criticality in polar fluids. *Physica A*. 2001;292:129.
27. Butter K., Bomans P.H.H., Frederik P.M., Vroege G.J., Philipse A. P. Direct observation of dipolar chains in ferrofluids in zero field using cryogenic electron microscopy. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2003;15(15):S1451.
28. Borin D., Stepanov G., Musikhin A., Zubarev A. Magnetorheological effect in dense magnetic polymers. *The European Physical Journal Special Topics*. 2022;231(6):1165–1173.

Информация об авторах / Information about the Authors

Шельдешова Елена Владимировна, старший преподаватель кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: blackberry__@mail.ru

Elena V. Shel'deshova, Senior Lecturer of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: blackberry__@mail.ru

Бондарь Елена Викторовна, инженер кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: e.v.bondar.31@mail.ru

Elena V. Bondar, Engineer of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: e.v.bondar.31@mail.ru

Шабанова Ирина Александровна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: irina-a-sh@mail.ru

Irina A. Shabanova, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: irina-a-sh@mail.ru

Чураев Александр Анатольевич, инженер кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: tchyaalex@yandex.ru

Alexander A. Churaev, Engineer of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: tchyaalex@yandex.ru

Соколов Евгений Александрович, преподаватель кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: evgeniysokolov1@yandex.ru

Evgeny A. Sokolov, Lecturer of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: evgeniysokolov1@yandex.ru

Матарыкин Константин Александрович, инженер кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: icego132@gmail.com

Konstantin A. Matarykin, Engineer of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: icego132@gmail.com

Ряполов Петр Алексеевич, доктор физико-математических наук, доцент, декан естественно-научного факультета, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: r-piter@yandex.ru

Petr A. Rjapolov, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor, Dean of the Faculty of Natural Sciences, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: r-piter@yandex.ru